

Последовательная обратная связь

Входное сопротивление

$$R'_{\text{BX}} = u'_{\text{BX}} / i'_{\text{BX}} \quad u_{\text{BX}} = u'_{\text{BX}} + u_{\text{OC}} = u'_{\text{BX}} + \beta u_{\text{ВЫХ}} \quad R'_{\text{BX}} = R_{\text{BX}} (1 - \beta K_u)$$

При $\beta K_u < 0$

$$R'_{\text{BX}} = R_{\text{BX}} (1 + |\beta K_u|)$$

Для обратной связи по току $\beta = u_{\text{OC}} / u_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{OC}} / R_{\text{H}}$ при $i'_{\text{BX}} \square i_{\text{H}}$

Выходное сопротивление

При $u'_{\text{BX}} = 0$ создадим на выходе $u_{\text{ВЫХ}}$

$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{u0} u_{\text{BX}} - R_{\text{ВЫХ}} i_{\text{ВЫХ}}$$

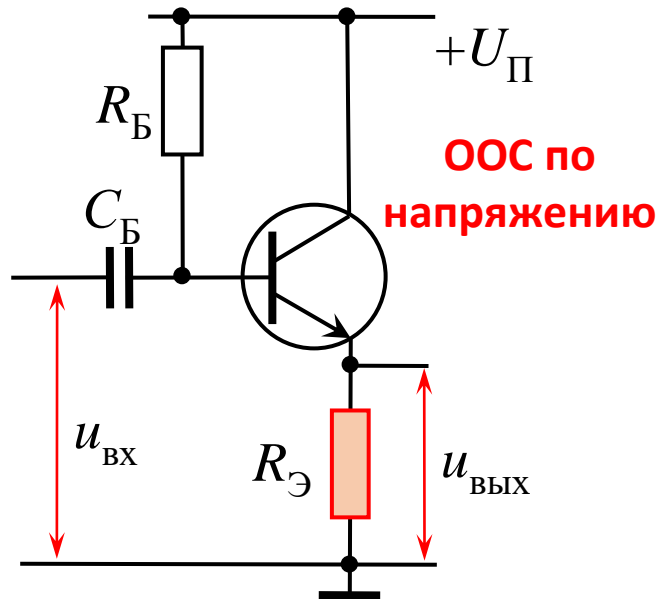
$$i_{\text{ВЫХ}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}} - K_{u0} u_{\text{BX}}}{R_{\text{ВЫХ}}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}} - K_{u0} \beta u_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВЫХ}}}$$

$$R'_{\text{ВЫХ}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВЫХ}}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{1 - \beta K_{u0}}$$

При отрицательной ОС ($\beta K_u < 0$)

$$R'_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{1 + |\beta K_{u0}|}$$

Примеры усилителей с отрицательной последовательной обратной связью



$$\beta = -1 \quad K_u = SR_{\text{Э}} \ll 1$$

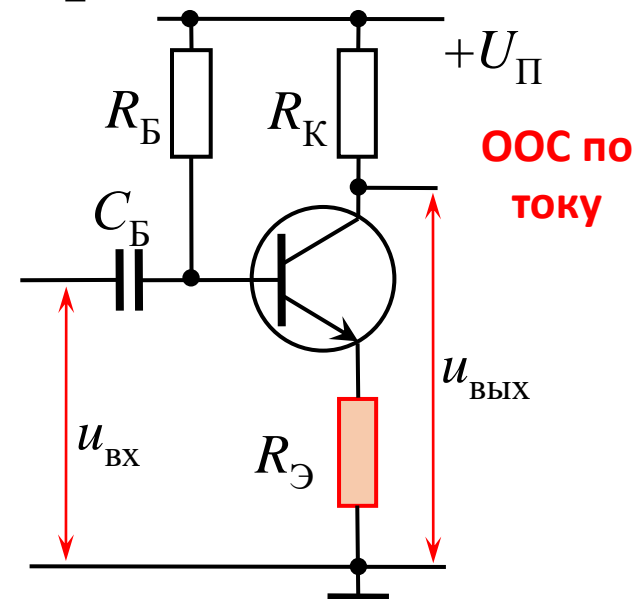
$$K'_u = SR_{\text{Э}} / (1 + SR_{\text{Э}}) < 1$$

$$R'_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} (1 + |\beta K_u|) = h_{11\text{Э}} (1 + SR_{\text{Э}}) =$$

$$= h_{11\text{Э}} + (1 + h_{21\text{Э}}) R_{\text{Э}}$$

$$R'_{\text{ВЫХ}} = r_{\text{кЭ}} / (1 + Sr_{\text{кЭ}}) =$$

$$= 1 / (S + 1/r_{\text{кЭ}}) \approx 1/S$$



$$\beta = R_{\text{Э}} / R_{\text{К}} \quad K_u = -SR_{\text{К}}$$

$$K'_u = -SR_{\text{К}} / (1 + SR_{\text{К}} \cdot (R_{\text{Э}} / R_{\text{К}})) =$$

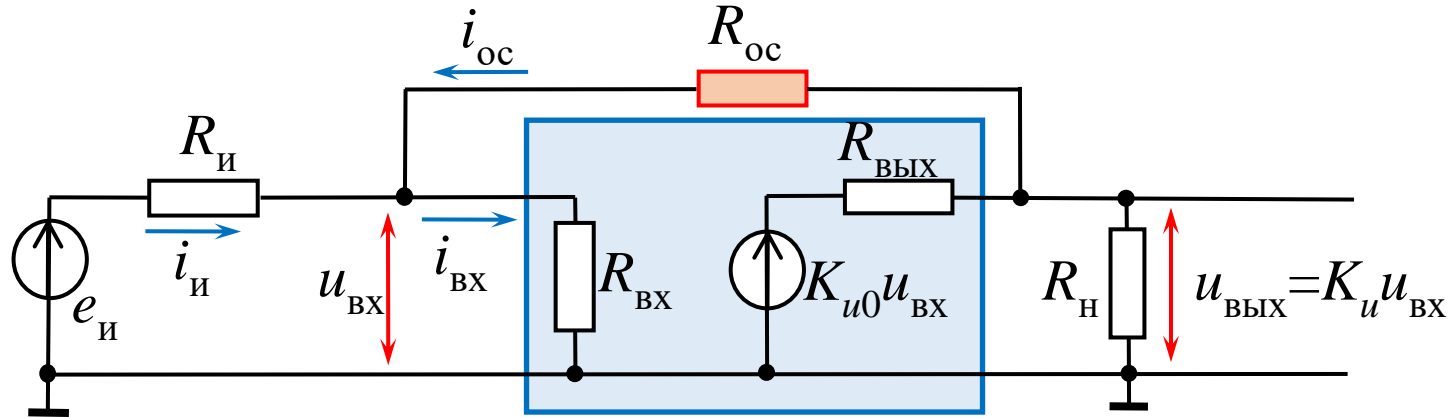
$$= -SR_{\text{К}} / (1 + SR_{\text{Э}}) \approx -R_{\text{К}} / R_{\text{Э}}$$

$$R'_{\text{ВХ}} = h_{11\text{Э}} + (1 + h_{21\text{Э}}) R_{\text{Э}}$$

$$R'_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{оС}} (1 + |K_{u0}|) =$$

$$= r_{\text{кЭ}} + R_{\text{Э}} (1 + Sr_{\text{кЭ}})$$

Параллельная обратная связь по напряжению



$$K'_u = K_u = K_{u0} \left(R_Н / (R_Н + R_{ВЫХ}) \right)$$

$$u_{ВХ} = \frac{R_{ВХ} \parallel R_{ОС}}{R_И + (R_{ВХ} \parallel R_{ОС})} e_И + \frac{R_{ВХ} \parallel R_И}{R_{ОС} + (R_{ВХ} \parallel R_И)} u_{ВЫХ}$$

$$\beta = \frac{R_{ВХ} \parallel R_И}{R_{ОС} + (R_{ВХ} \parallel R_И)}$$

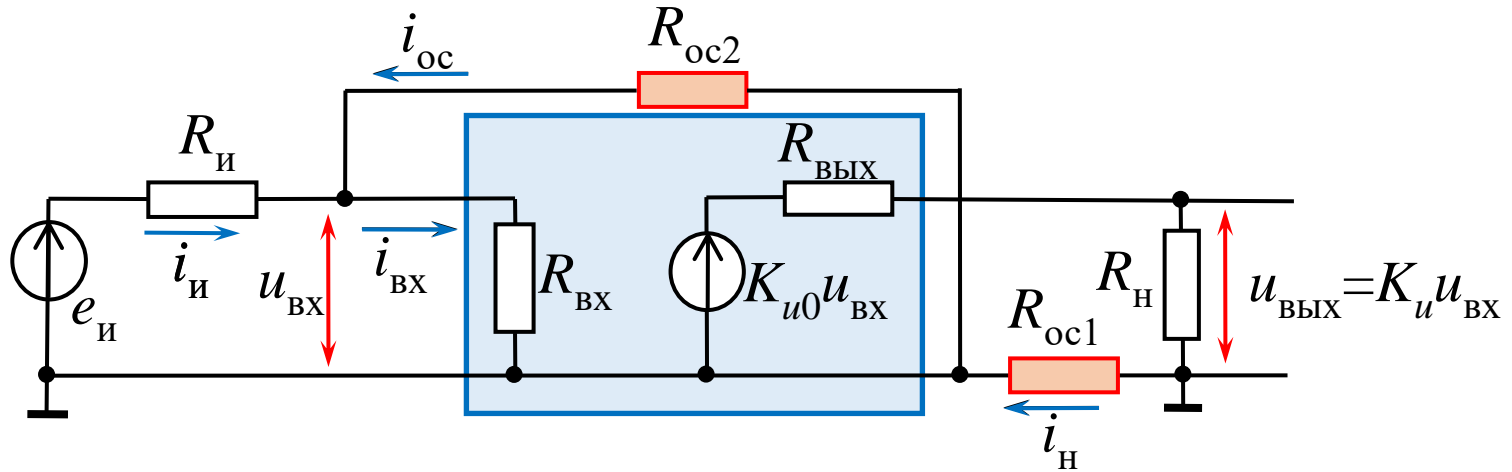
$$K'_e = \frac{u_{ВЫХ}}{e_И} = \frac{\gamma K_u}{1 - \beta K_u}$$

$$\gamma = \frac{R_{ВХ} \parallel R_{ОС}}{R_И + (R_{ВХ} \parallel R_{ОС})}$$

$$R'_{ВХ} = R_{ВХ} \parallel \frac{R_{ОС}}{1 - K_u}$$

$$R'_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 - \beta K_{u0}}$$

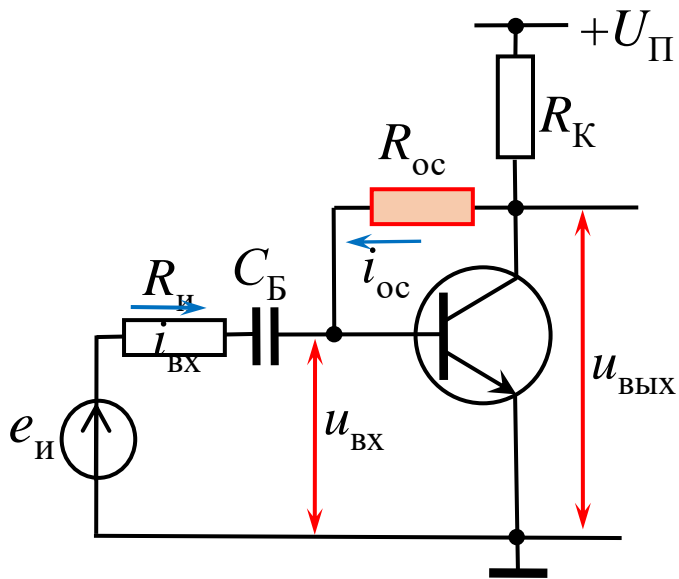
Параллельная обратная связь по току



$$\gamma = \frac{R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{ОС2}}}{R_{\text{И}} + (R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{ОС2}})}, \quad \beta = \beta_1 \cdot \beta_2, \quad \beta_1 = \frac{R_{\text{ОС1}}}{R_{\text{Н}}}, \quad \beta_2 = \frac{R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{И}}}{R_{\text{ОС2}} + (R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{И}})},$$

$$K'_e = \frac{\gamma K_u}{1 - \beta K_u} \quad R'_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} \parallel \frac{R_{\text{ОС2}}}{1 - \beta_1 K_u} \quad R'_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{ОС1}} (1 - \beta K_{u0})$$

Пример усилителя с отрицательной параллельной обратной связью по напряжению



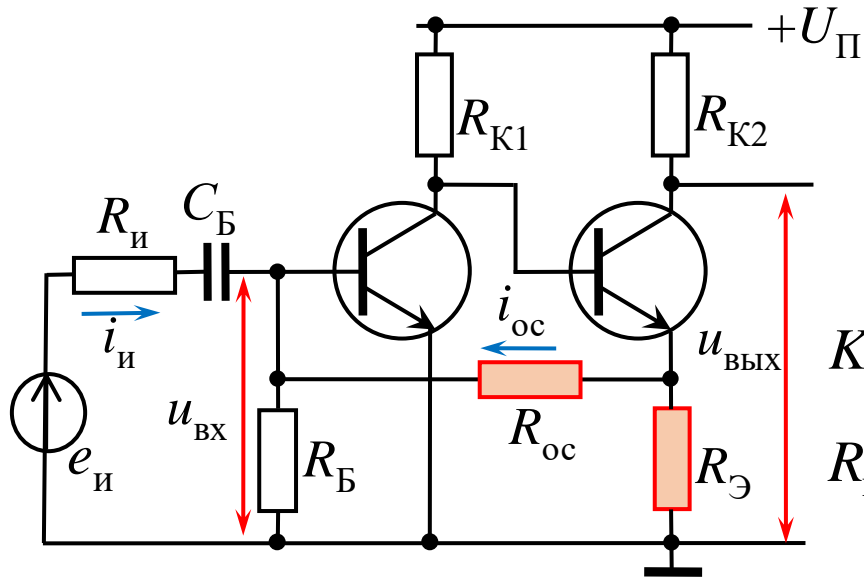
$$K_u = -SR_K$$

$$R_{\text{ВХ}} \approx h_{21э} \parallel \frac{R_{\text{ос}}}{1 + K_u}$$

$$K'_e = \frac{\gamma K_u}{1 + \beta K_u}$$

$$\gamma \approx \frac{h_{11э}}{h_{11э} + R_{\text{и}}} \quad \beta = \frac{h_{11э} \parallel R_{\text{и}}}{(h_{11э} \parallel R_{\text{и}}) + R_{\text{ос}}}$$

Пример усилителя с отрицательной параллельной обратной связью по току



$$K_u = K_1 \cdot K_2 = -S(R_{K1} \parallel R_{BX2}) \cdot (-R_{K2}/R_{\mathcal{E}})$$

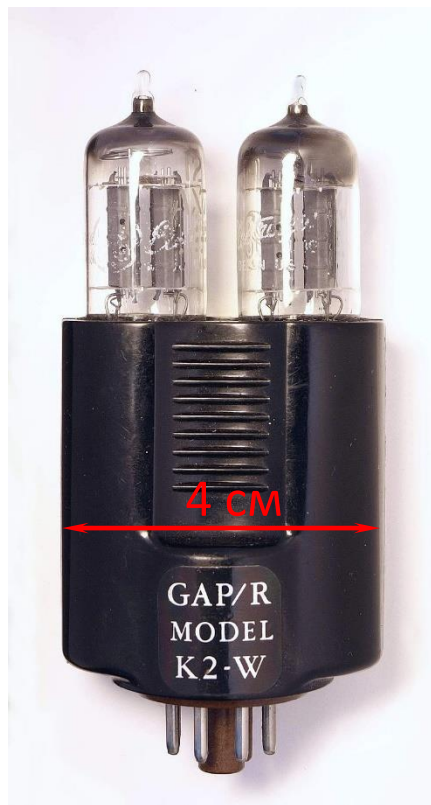
$$R_{BX2} \approx (h_{21\mathcal{B}} + 1)(r_{\mathcal{B}} + R_{\mathcal{E}}) \text{ при } R_{\mathcal{B}}, R_{oc} > h_{11\mathcal{B}}^{(1)}$$

$$K'_e = \frac{\gamma K_u}{1 + \beta K_u}$$

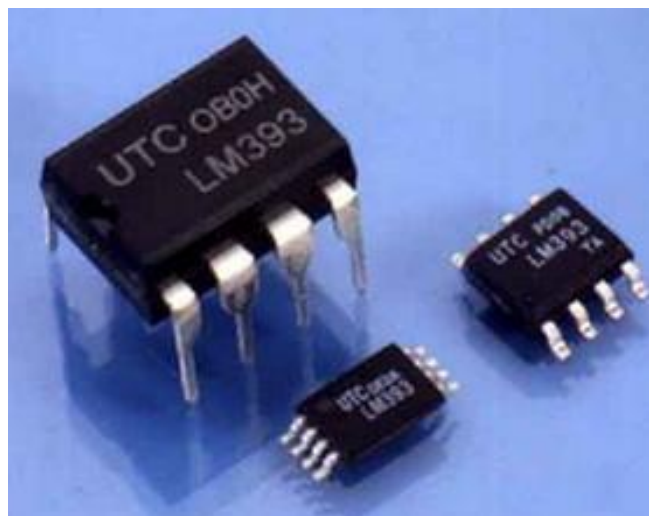
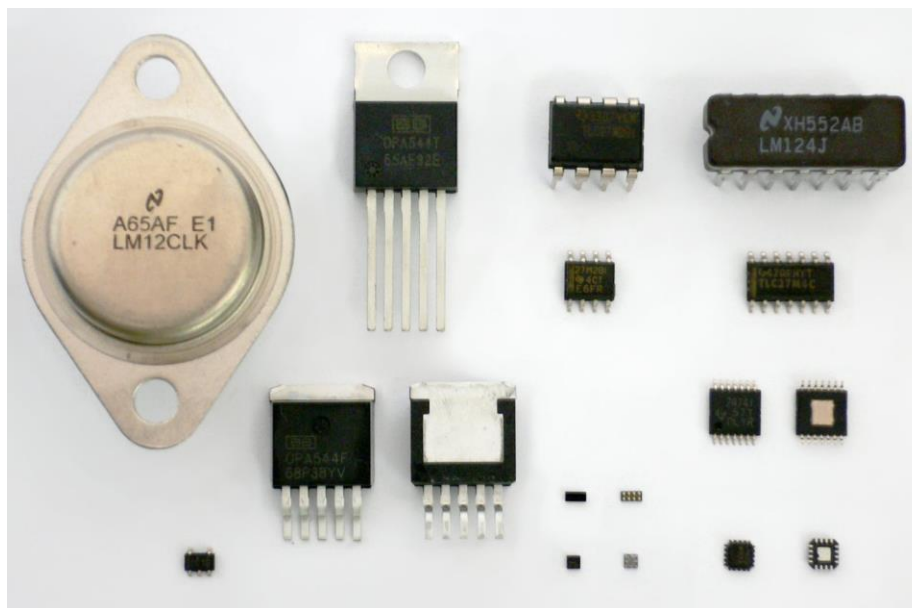
$$R'_{BX} \approx h_{11\mathcal{B}}^{(1)} \parallel \frac{R_{oc}}{1 + K_1}$$

$$\gamma \approx \frac{h_{11\mathcal{B}}^{(1)}}{h_{11\mathcal{B}}^{(1)} + R_{\mathcal{H}}} \quad \beta = \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{R_{\mathcal{E}}}{R_{K2}} \cdot \frac{h_{11\mathcal{B}}^{(1)} \parallel R_{\mathcal{H}}}{(h_{11\mathcal{B}}^{(1)} \parallel R_{\mathcal{H}}) + R_{oc}}$$

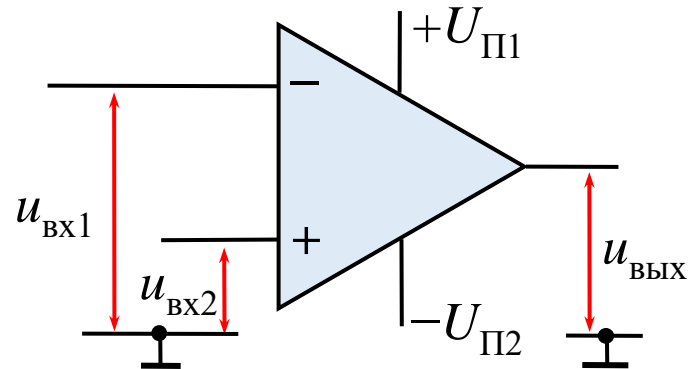
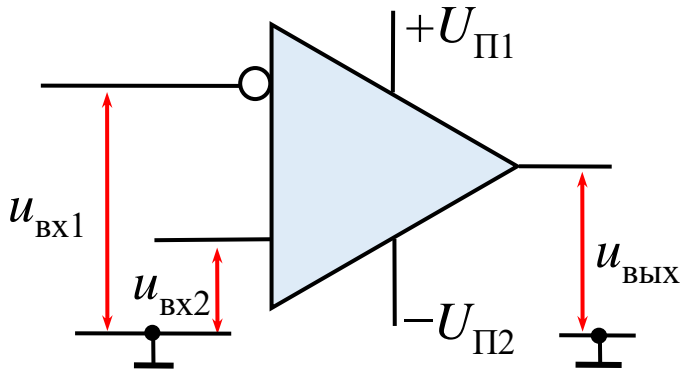
ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



1940-е годы



ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



Основные параметры операционного усилителя

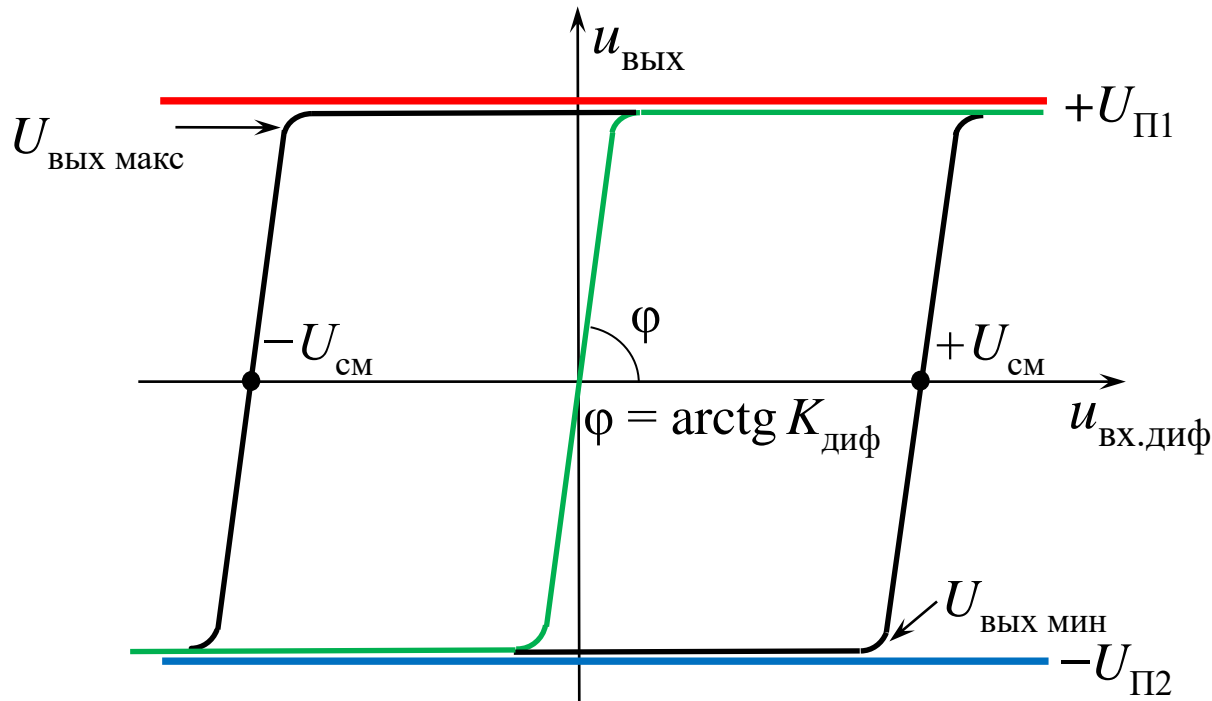
$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{диф}} (u_{\text{ВХ2}} - u_{\text{ВХ1}}) \quad K_{\text{диф}} = 10^3 \div 10^6$$

$$\text{КОСС} = 20 \lg \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{сф}}} \quad \text{КОСС} = 60 \div 120 \text{ дБ}$$

$$R_{\text{ВХ}} \geq 10^6 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ВЫХ}} \leq 200 \text{ Ом}$$

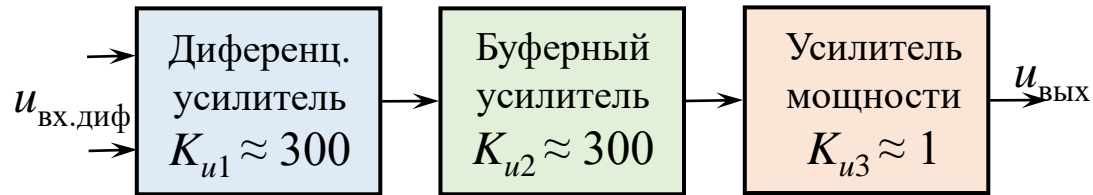
Напряжение смещения $U_{\text{см}}$: типичные значения составляют $10^{-3} \div 10^{-6}$ В



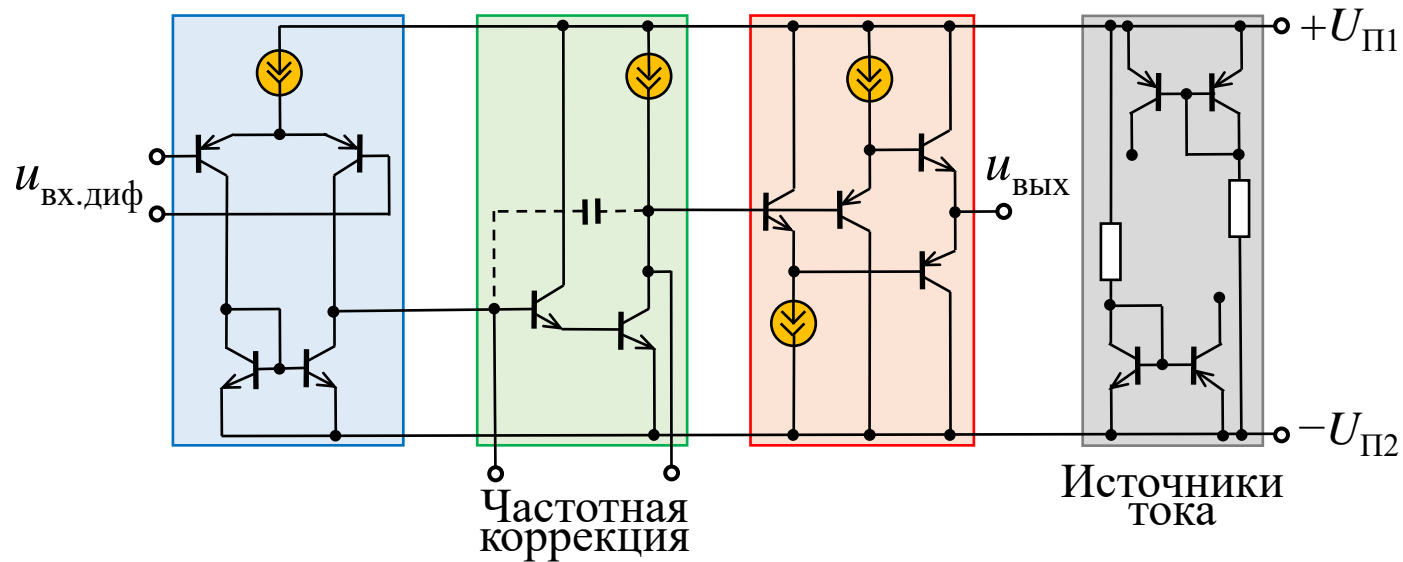
Входной ток: типичные значения входного тока составляют $10^{-9} \div 10^{-12}$ А.

Сопротивление нагрузки: типичное минимальное сопротивление нагрузки составляет 2 кОм.

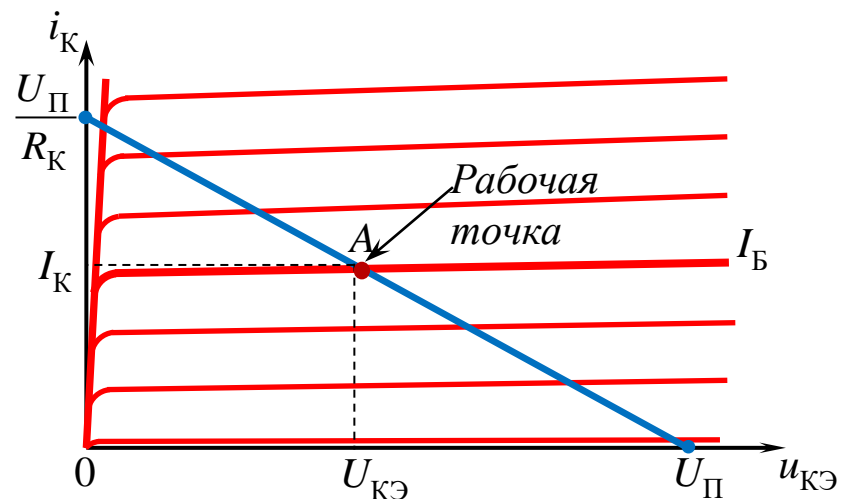
Структура операционного усилителя (ОУ)



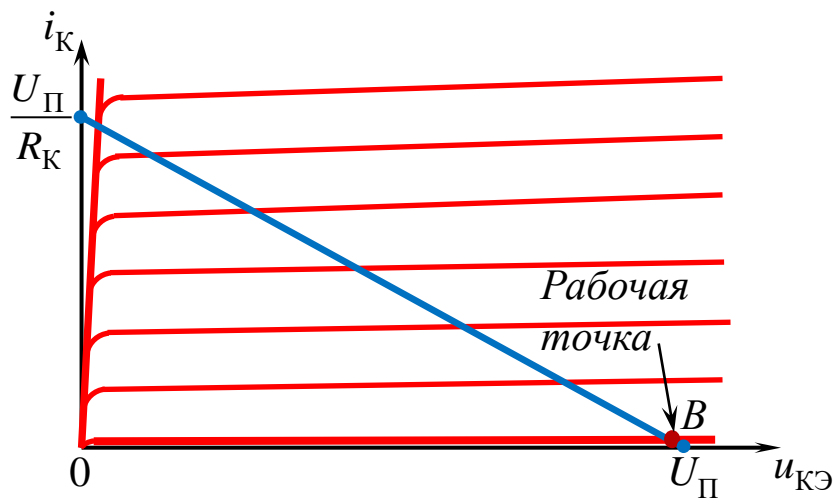
$$K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \approx 10^5$$



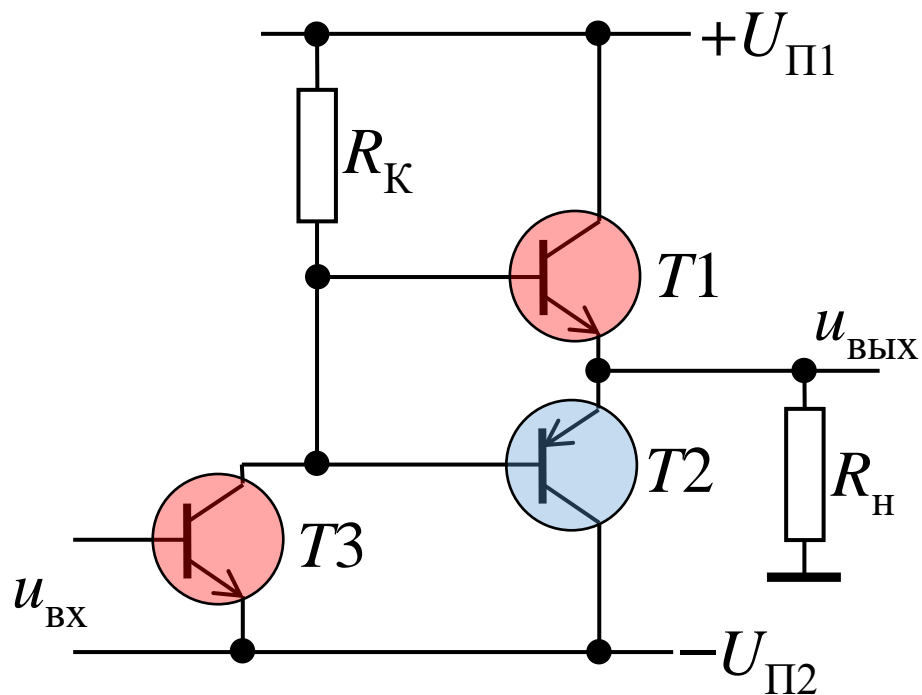
Усилитель мощности (класс В)



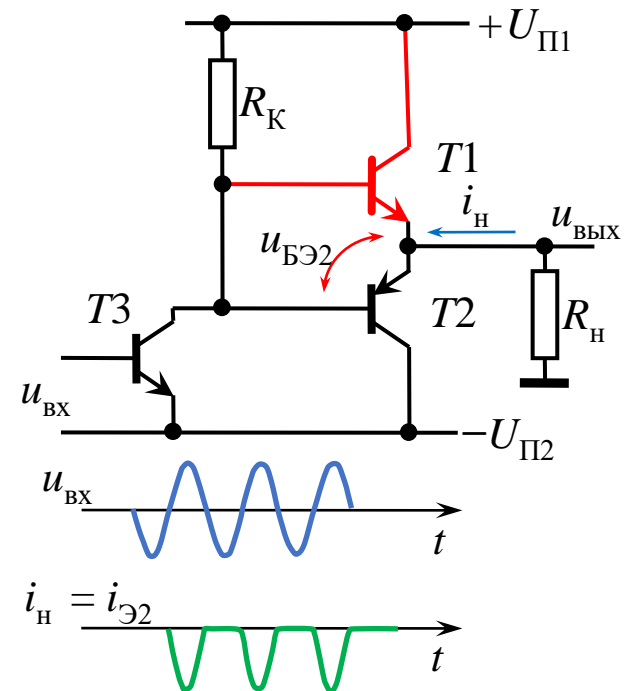
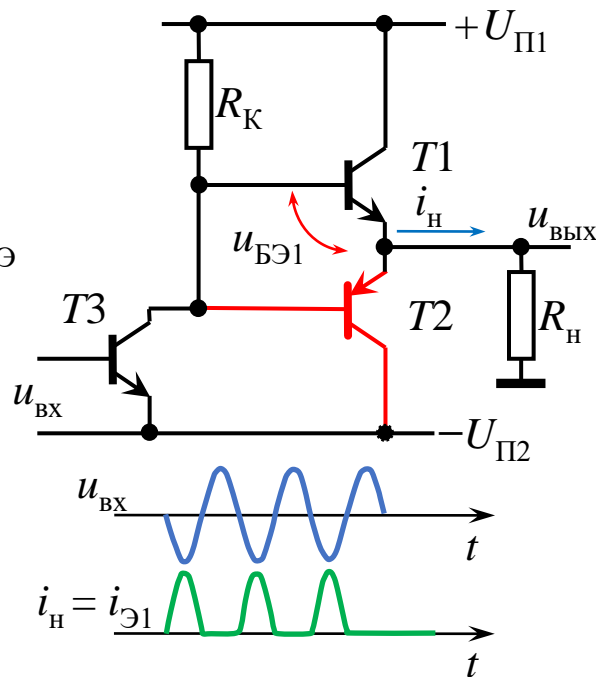
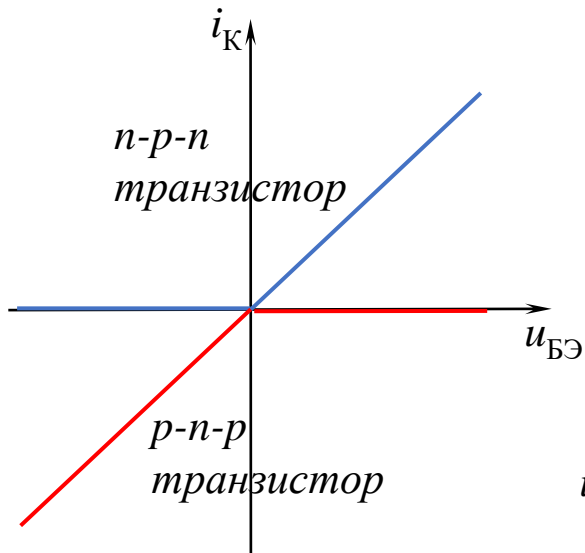
Класс А



Класс В

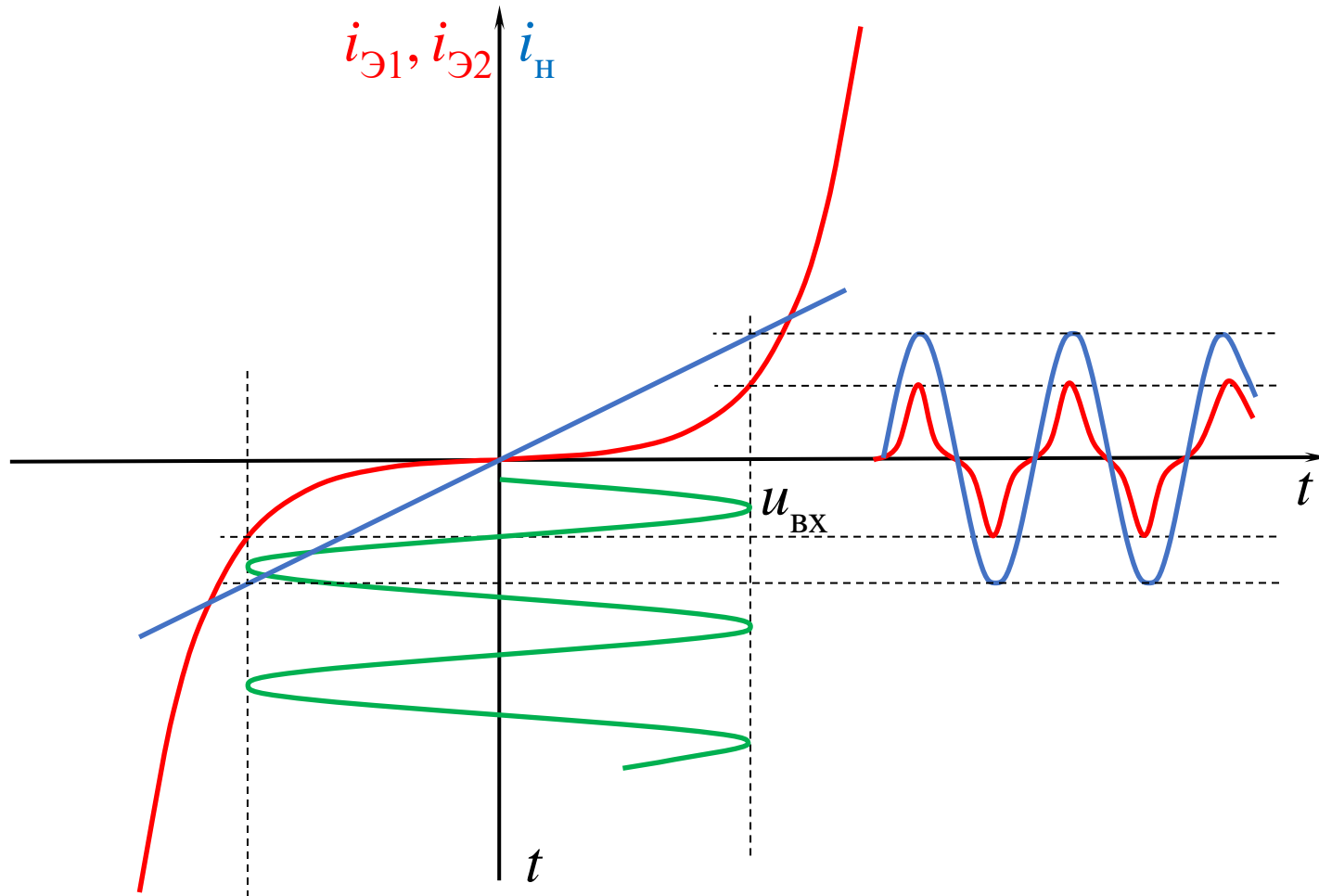


Усилитель мощности (класс В)

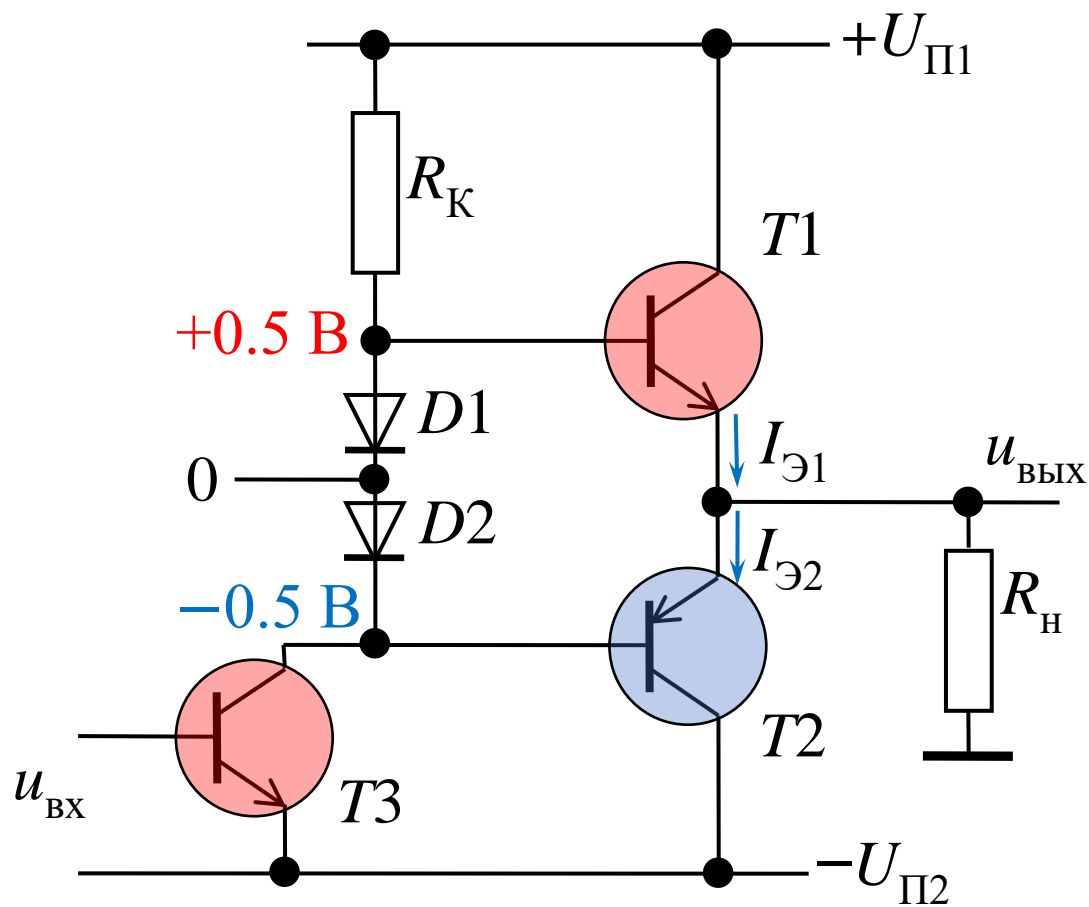


$$\text{КПД} \leq (\pi/4) \cdot 100 \%$$

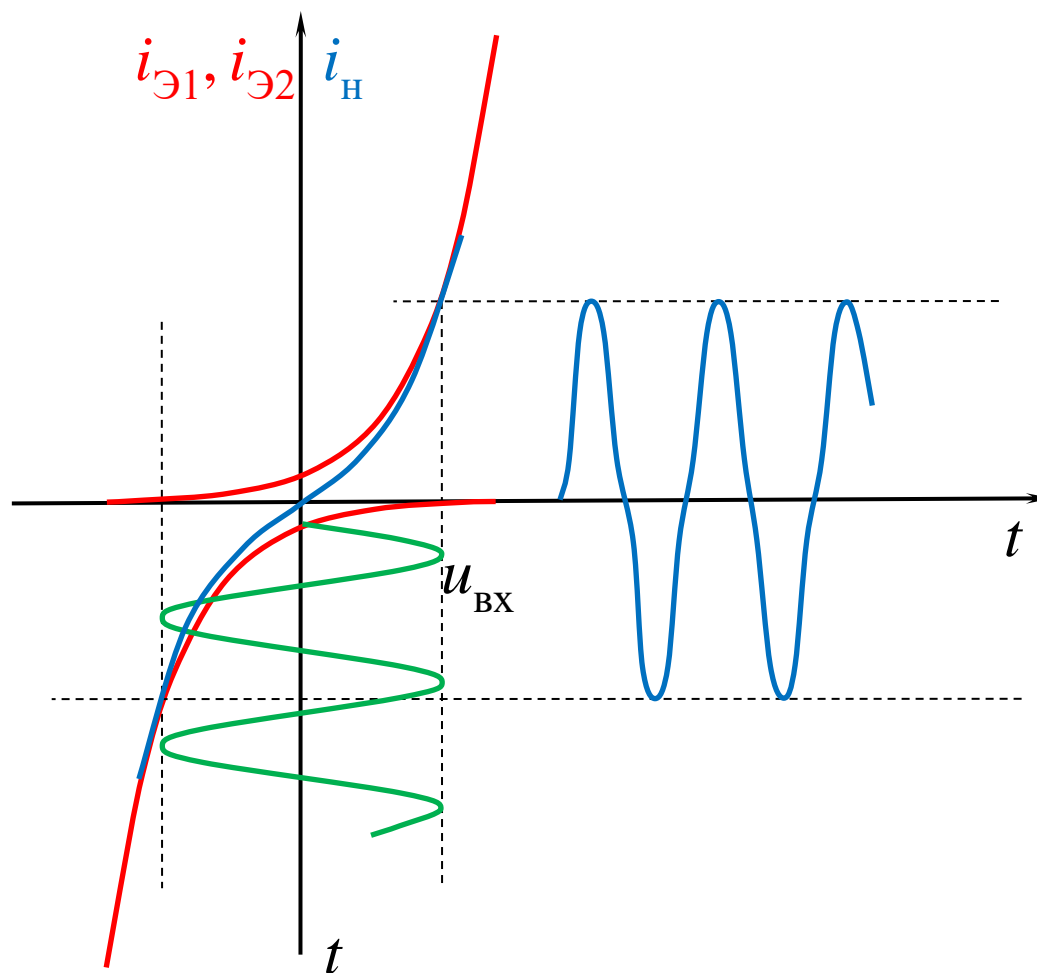
Искажение сигнала в усилителе мощности



Уменьшение искажения сигнала в усилителе мощности

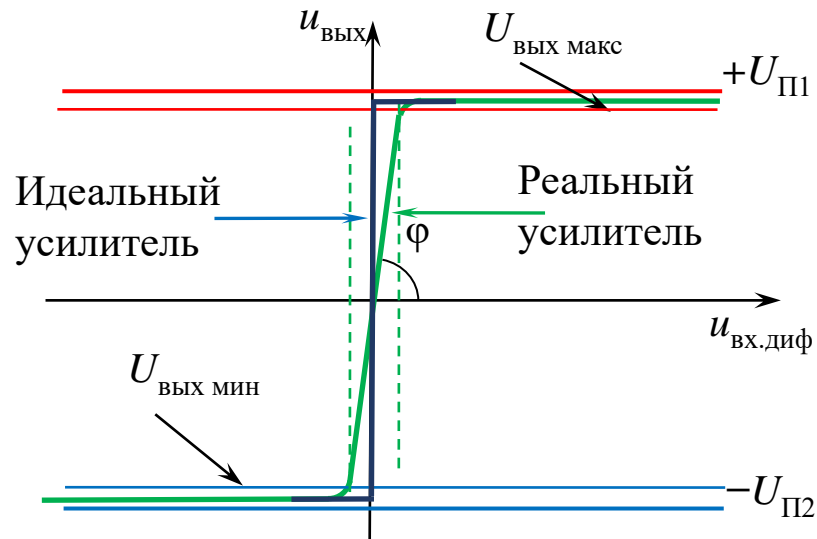
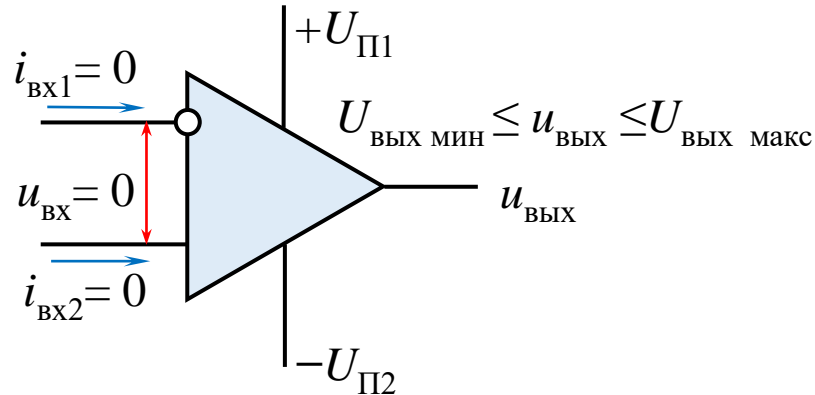


Уменьшение искажения сигнала в усилителе мощности



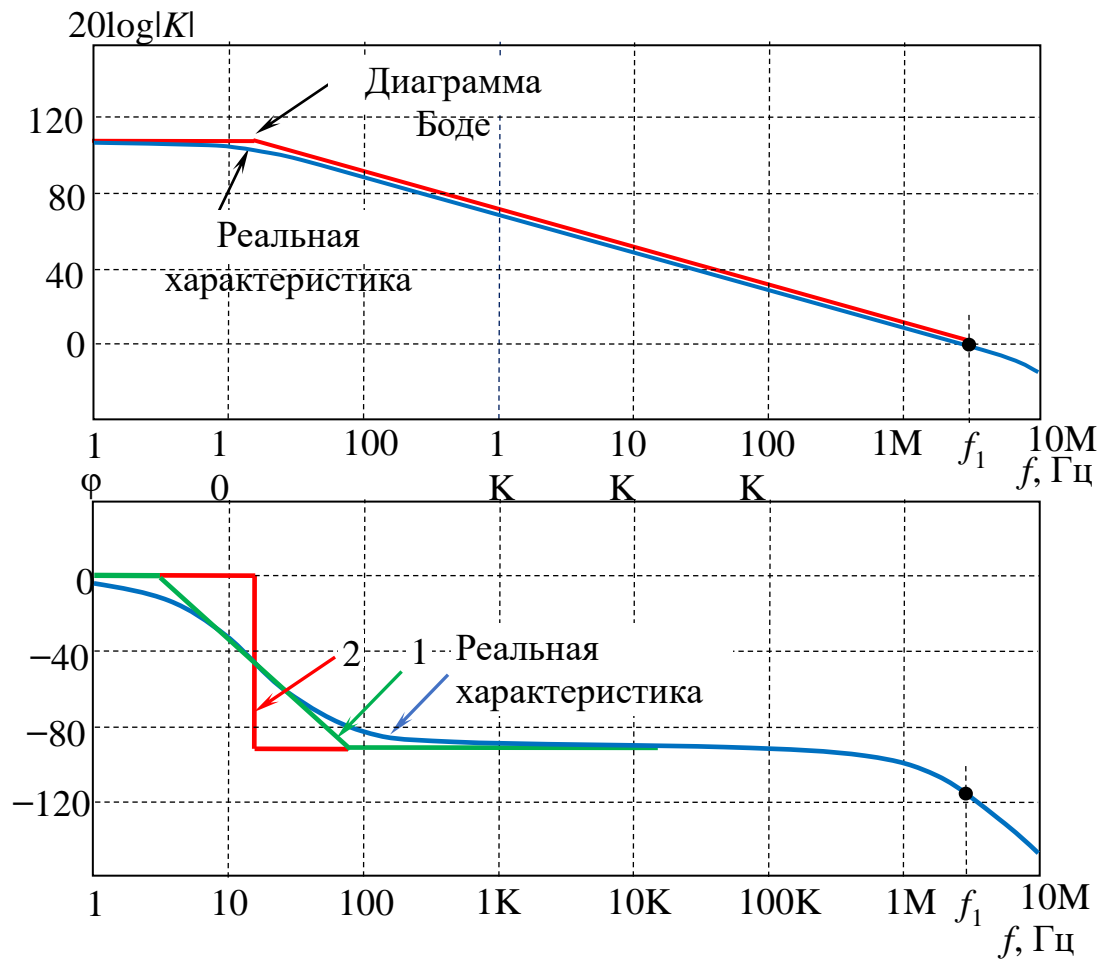
«Идеальный» операционный усилитель (ОУ)

$$\begin{aligned} K_{\text{диф}} &= \infty, \\ R_{\text{вх}} &= \infty, \\ R_{\text{вых}} &= 0. \end{aligned}$$

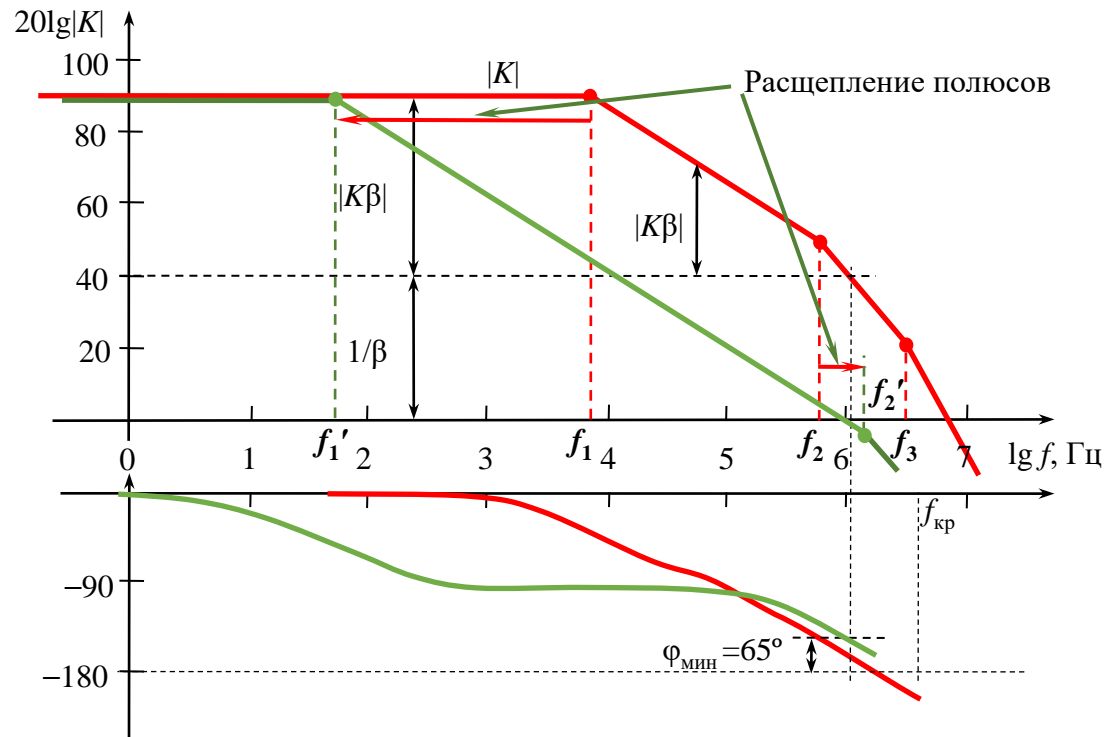
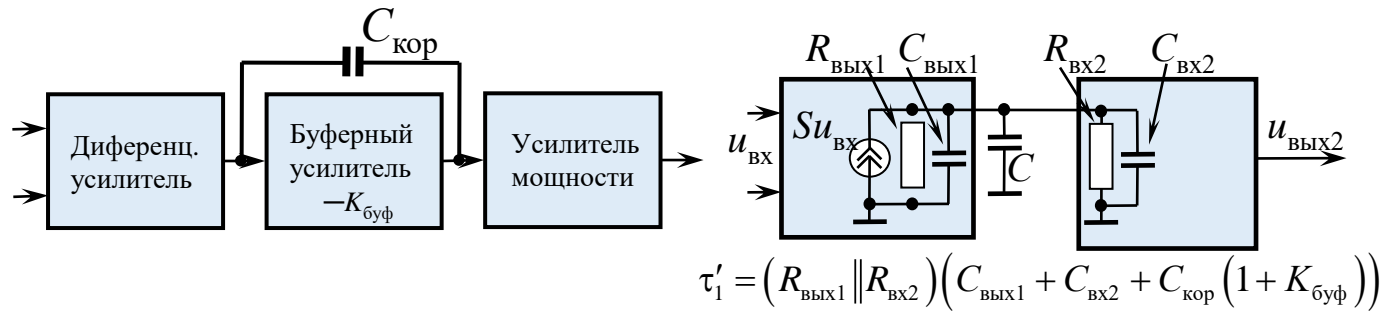


$$\varphi = \arctg K_{\text{диф}}$$

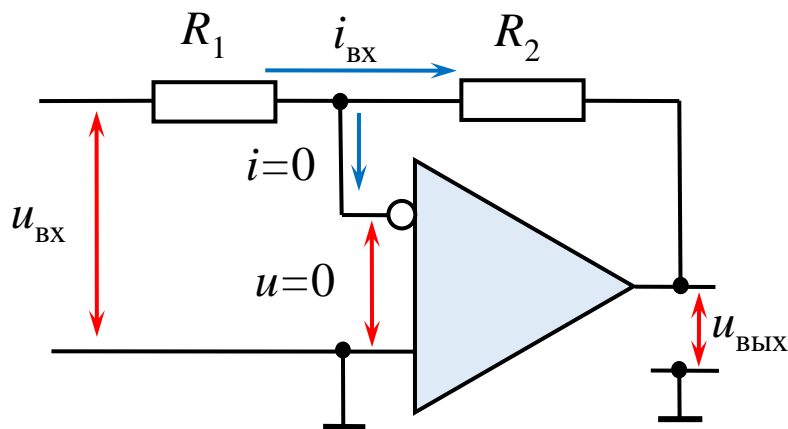
Частотная характеристика операционного усилителя (ОУ)



Коррекция частотной характеристики ОУ



Применение операционных усилителей



$$i_{\text{BX}} = u_{\text{BX}} / R_1$$

$$u_{R_2} = i_{\text{BX}} \cdot R_2 = u_{\text{BX}} \cdot R_2 / R_1$$

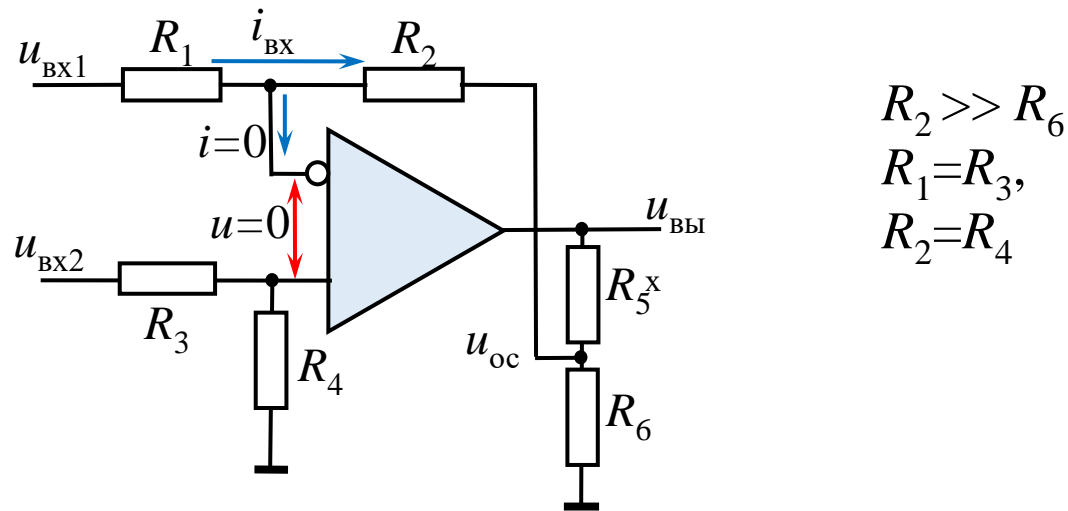
$$u_{\text{ВЫХ}} = -u_{R_2} = -u_{\text{BX}} \cdot R_2 / R_1$$

$$K = -R_2 / R_1.$$

$$K = \frac{-\gamma K_{\text{диф}}}{1 + \beta K_{\text{диф}}} \quad \gamma = R_2 / (R_1 + R_2), \quad \beta = R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$\text{При } K_{\text{диф}} \rightarrow \infty \quad K = -\gamma / \beta = -R_2 / R_1$$

Применение операционных усилителей



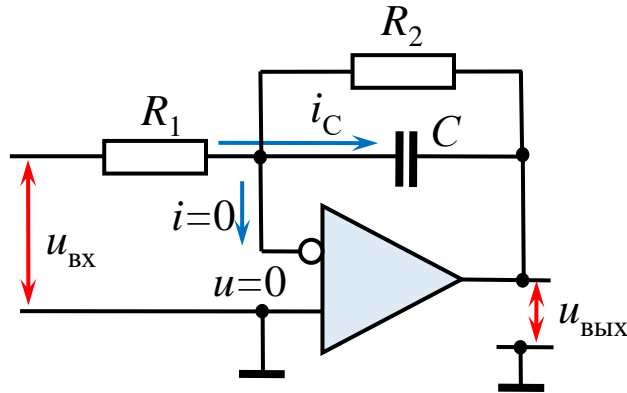
$$\begin{aligned}
 u_{oc} &= -u_{BX1} \cdot (R_2/R_1) + u_{BX2} \cdot (R_2/(R_1 + R_2)) \cdot (1 + (R_2/R_1)) = \\
 &= (R_2/R_1) \cdot (u_{BX2} - u_{BX1})
 \end{aligned}$$

$$u_{oc} = u_{ВЫХ} \cdot (R_6/(R_5 + R_6))$$

$$K = \frac{u_{ВЫХ}}{u_{BX2} - u_{BX1}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_5 + R_6}{R_6}$$

Частотно-зависимая обратная связь

Интегратор



$$R_2 \gg R_1.$$

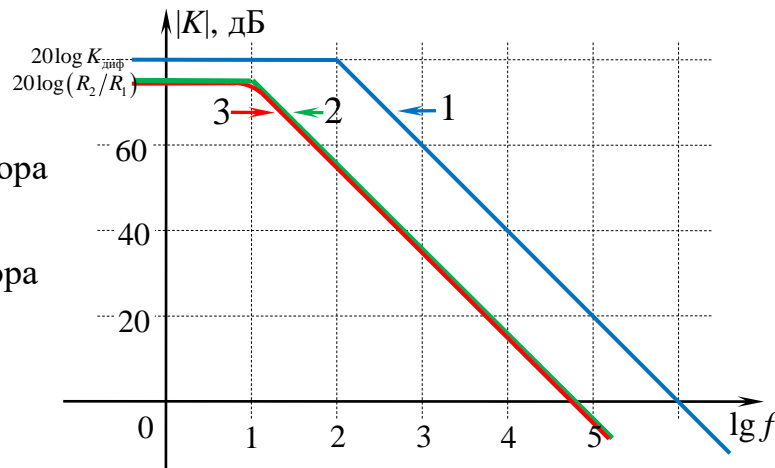
$$Z_C = 1/j\omega C$$

$$K(j\omega) = -1/j\omega R_1 C.$$

1– диаграмма Бode ОУ

2– диаграмма Бode интегратора

3– реальная частотная характеристика интегратора

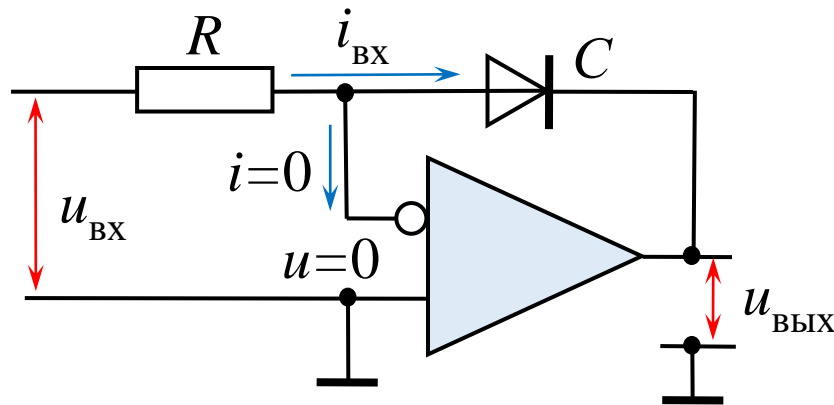


$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int \frac{u_{BX}}{R_1} dt =$$

$$= \frac{1}{R_1 C} \int u_{BX} dt$$

$$u_{ВЫХ} = -\frac{1}{R_1 C} \int u_{ВЫХ} dt$$

Логарифмические преобразователи



$$i = I_0 \left(\exp(u/U_T) - 1 \right),$$

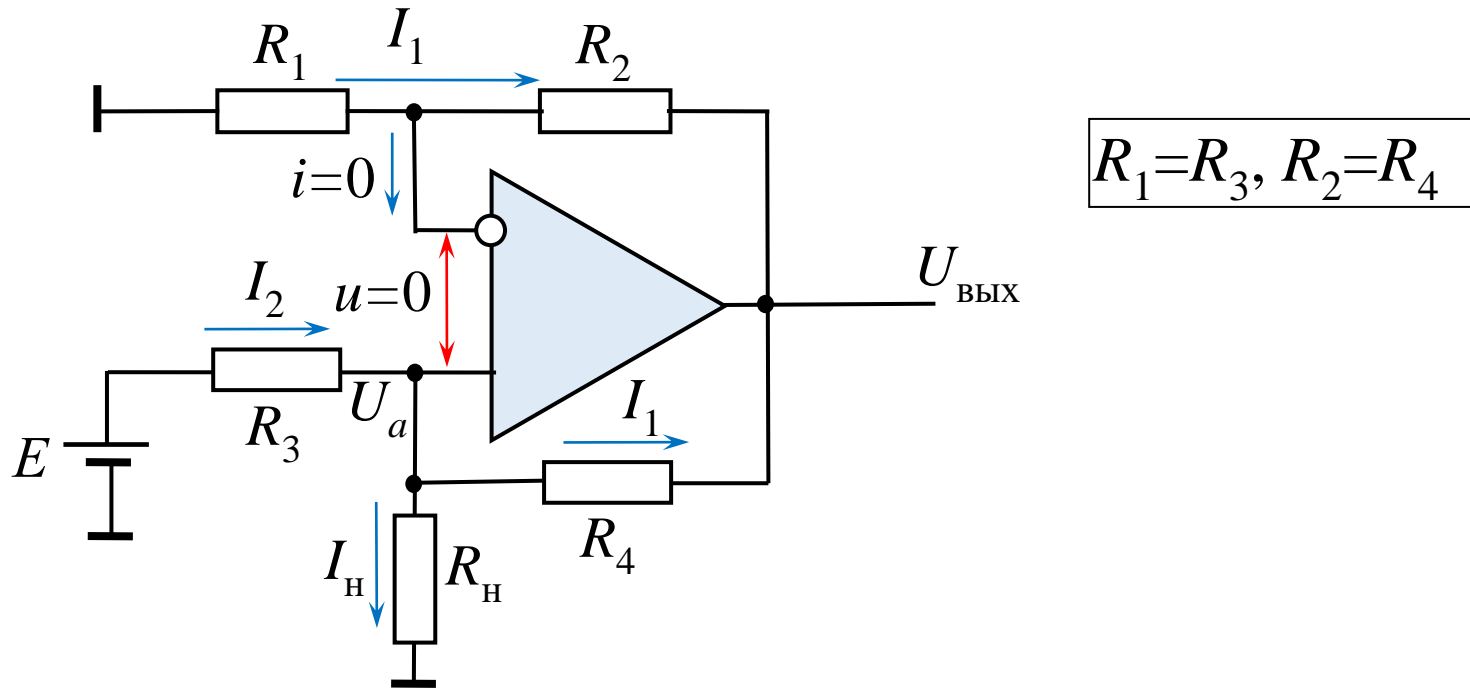
$$i_{\text{BX}} = u_{\text{BX}} / R = I_0 \left(\exp(-u_{\text{ВЫХ}} / U_T) - 1 \right)$$

$$u_{\text{ВЫХ}} = -U_T \cdot \ln \left(\left(u_{\text{BX}} / (RI_0) \right) - 1 \right).$$

При $u_{\text{BX}} / R \gg I_0$

$$u_{\text{ВЫХ}} \approx -U_T \cdot \ln \left(u_{\text{BX}} / (RI_0) \right).$$

Источник тока

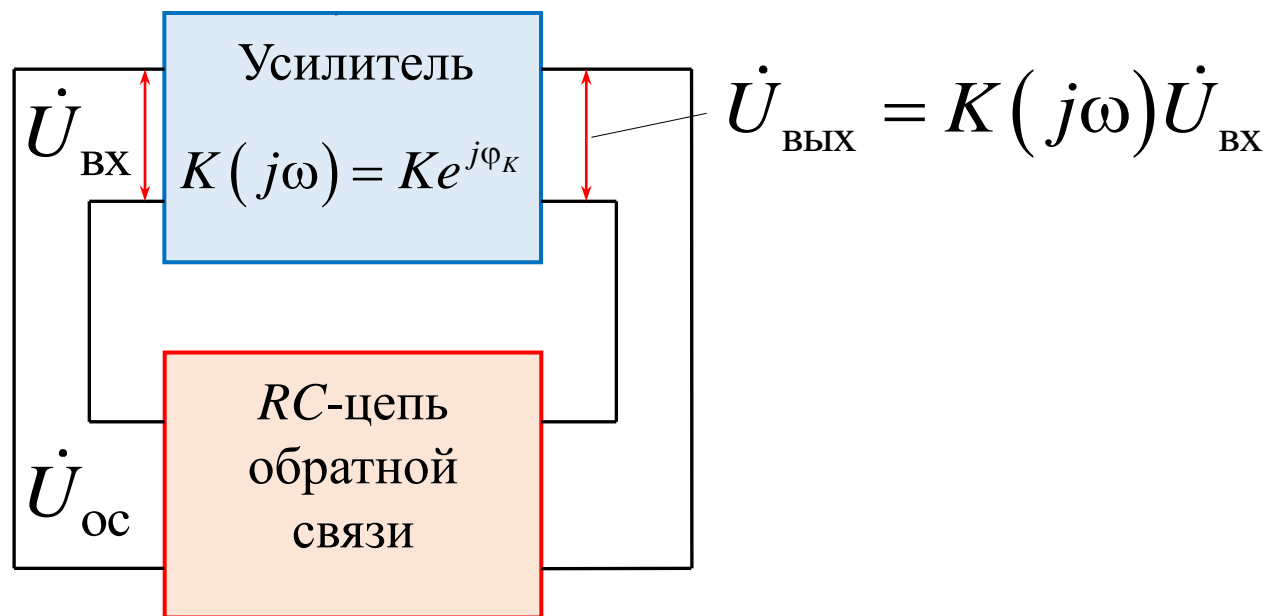


$$I_2 = (E - U_a) / R_3 \quad I_1 = -U_a / R_1 \quad I_H = I_2 - I_1 = E / R_1$$

$$U_a = ER_H / R_1 \quad |U_{\text{вых}}| = |U_a| \cdot (R_1 + R_2) / R_1 = \frac{|E|(R_1 + R_2)}{R_1^2} \cdot R_H < |U_{\Pi}|$$

$$R_H < \frac{R_1^2}{|E|(R_1 + R_2)} \cdot |U_{\Pi}|$$

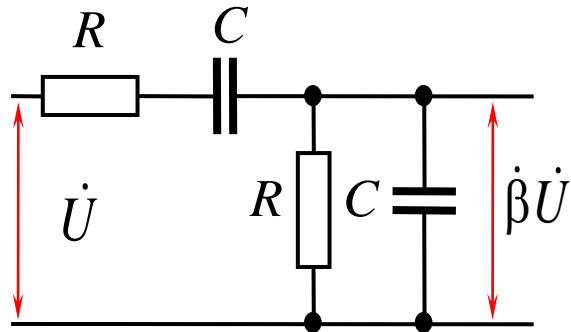
RC- генераторы



$$|K(j\omega)| \cdot |\beta(j\omega)| > 1$$

$$\arg K(j\omega) + \arg \beta(j\omega) = 2\pi n.$$

RC- генераторы

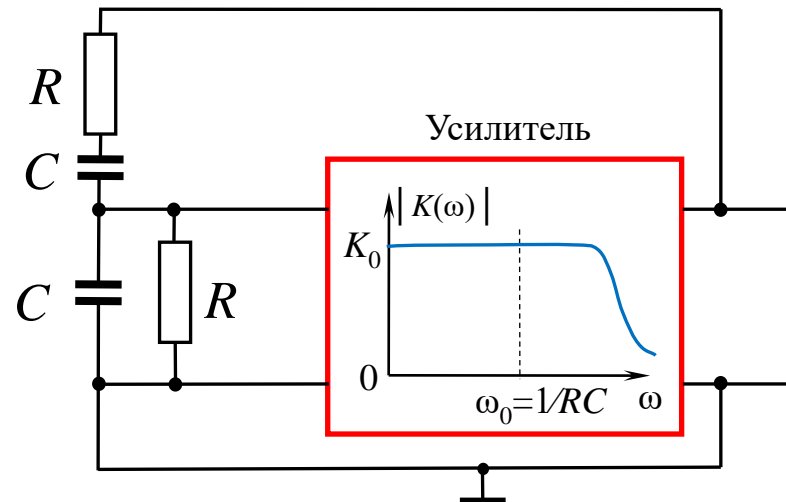
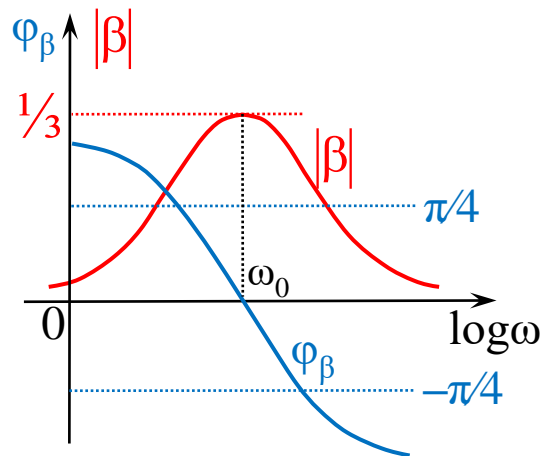


$$T = RC$$

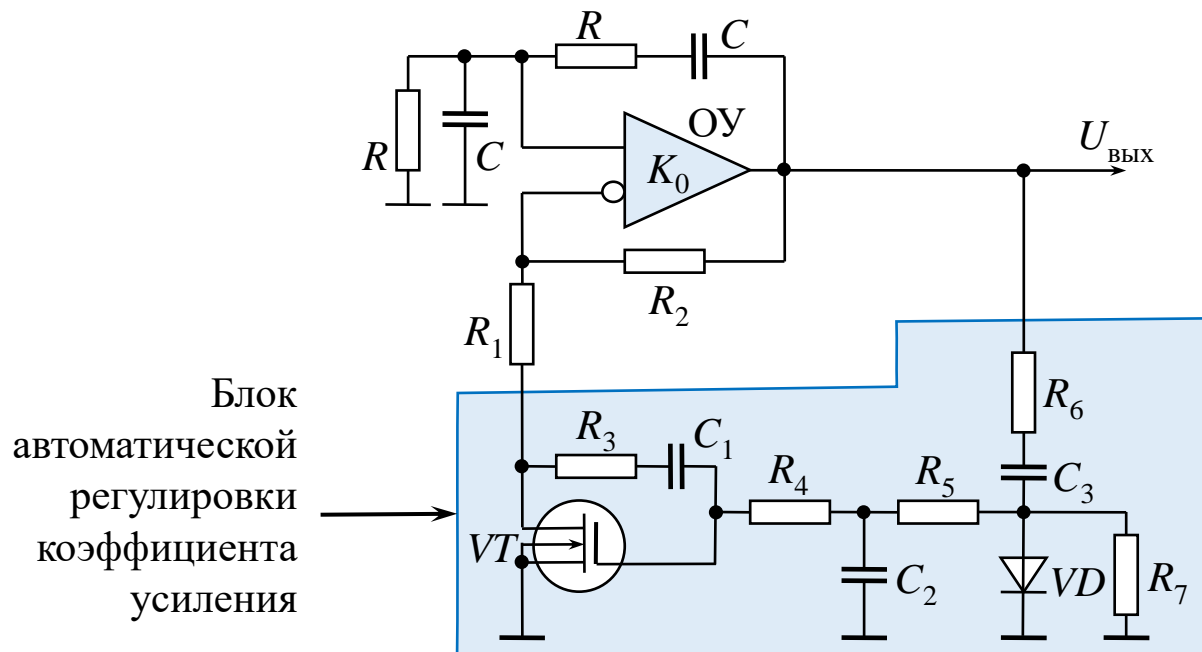
$$\dot{\beta} = \frac{1}{3 + j(\omega T - 1/\omega T)}$$

$$|\beta| = \frac{1}{\sqrt{9 + (\omega T - 1/\omega T)^2}}$$

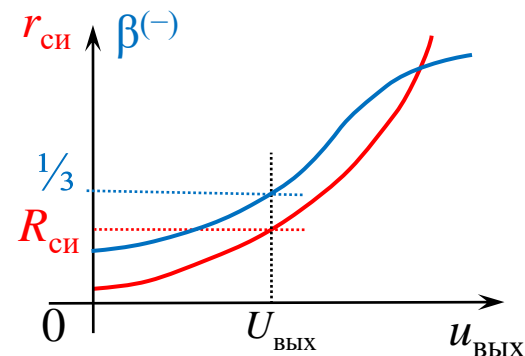
$$\varphi_{\beta} = -\arctg \left[\frac{1}{3} \left(\omega T - \frac{1}{\omega T} \right) \right].$$



РС-генератор с мостом Вина

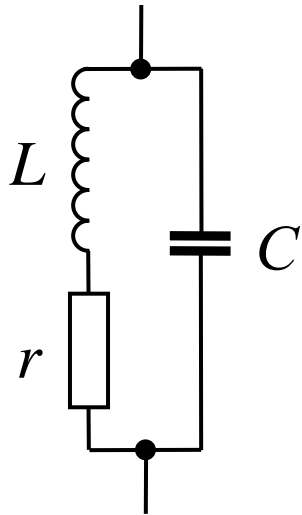


$$\dot{\beta} = \dot{\beta}^{(+)} - \dot{\beta}^{(-)} \quad \beta^{(-)} = (R_1 + r_{\text{си}}) / (R_2 + R_1 + r_{\text{си}})$$



$$\dot{K}_0 \dot{\beta} > 1 \quad \beta^{(-)} < \frac{1}{3} - \frac{1}{K_0} \quad \beta^{(-)} = (R_1 + R_{\text{си}}) / (R_2 + R_1 + R_{\text{си}}) = \frac{1}{3} - \frac{1}{K_0}$$

РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



Параллельный колебательный контур

Резонансная частота $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC}$, $\rho = \sqrt{L/C}$

Добротность $Q = \omega_0 L / r = 1 / \omega_0 C r = \rho / r$

$$Z = \frac{(j\omega L + r) \cdot (1/j\omega C)}{j\omega L + r + (1/j\omega C)}$$

При $\omega \approx \omega_0$ и $\rho \gg r$

$$Z = \frac{L/C}{j\omega L + r + (1/j\omega C)} = \frac{\rho^2 \cdot j\omega C}{1 + j\omega C r - \omega^2 LC} = \frac{j\rho}{j/Q + (\omega_0^2 - \omega^2)/\omega_0^2} =$$

$$= \frac{Q\rho}{1 + jQ(\omega^2 - \omega_0^2)/\omega_0^2} = \frac{R_{\text{экв}}}{1 + j2Q(\Delta\omega/\omega_0)} \quad \Delta\omega = \omega - \omega_0$$

На резонансной частоте

$\Delta\omega = 0$ и $Z = R_{\text{экв}}$

$$\Delta f_{0.7} = f_0 / Q$$

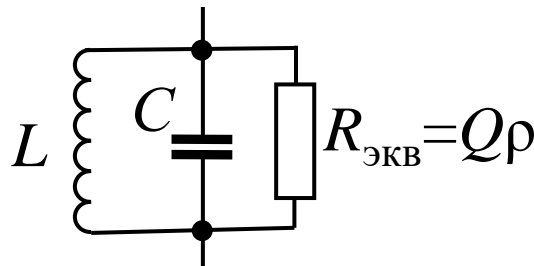
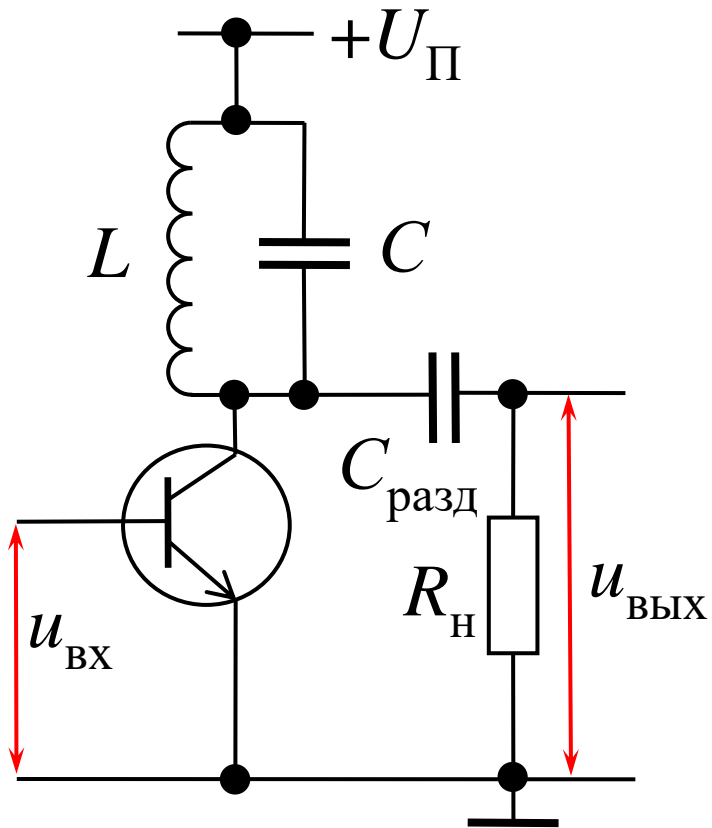


Схема резонансного усилителя

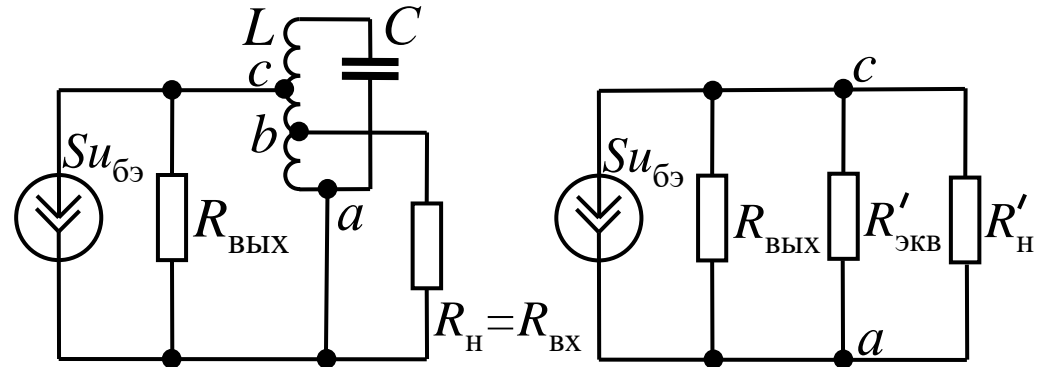
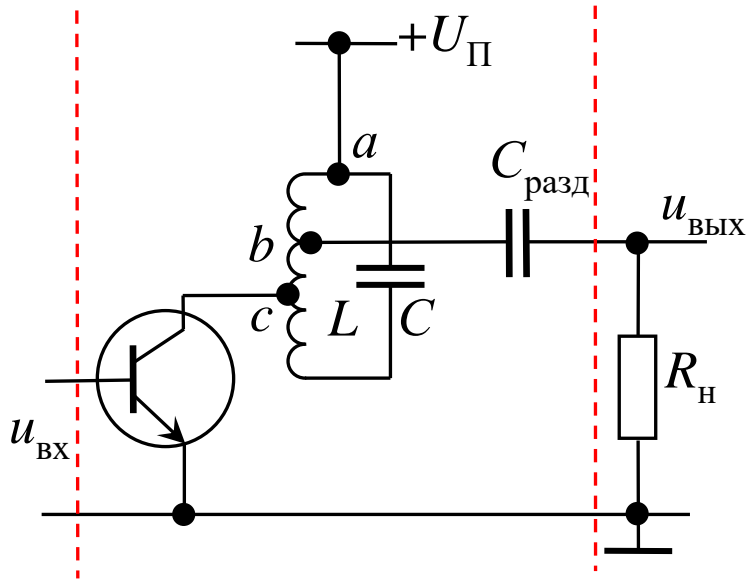


$$K_{\text{рез}} = -S \cdot (R_{\text{ЭКВ}} \parallel R_{\text{Н}})$$

$$Q^* = \frac{R^*}{\rho} = \frac{R_{\text{ЭКВ}} \cdot R_{\text{Н}}}{\rho (R_{\text{ЭКВ}} + R_{\text{Н}})} = Q \cdot \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{ЭКВ}}}$$

$$\Delta f_{0.7} = \frac{\omega_0}{Q^*}$$

Схема резонансного усилителя



$$R'_H = R_{BX} / n_b^2 \quad n_b = w_b / w_c$$

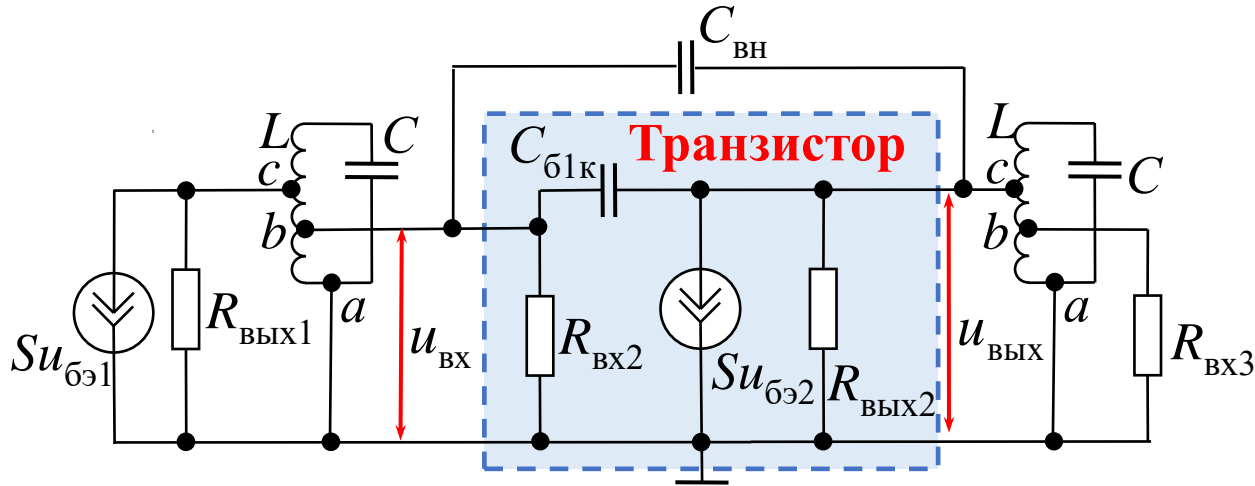
$$R'_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЭКВ}} / n_c^2 \quad n_L = w_L / w_c$$

w_x — ЧИСЛО ВИТКОВ МЕЖДУ ТОЧКАМИ x И a

$$K_1 = \frac{u_c}{u_{BX}} = -SR_{ca} = -S \left(R_{\text{ВЫХ}} \parallel R'_{\text{ЭКВ}} \parallel R'_H \right)$$

$$K = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{BX}} = K_1 \cdot n_b = K_1 \cdot \frac{w_b}{w_c}$$

Устойчивость резонансного усилителя



$$\dot{K} = -S\dot{Z}_K \quad \dot{\beta} = \dot{Z}_b / \left(\dot{Z}_b + 1 / (j\omega C_{\text{пр}}) \right), \quad C_{\text{пр}} = C_{\text{ВН}} + C_{\text{б1к}}$$

$$\text{При } |\dot{Z}_b| \ll |1 / (j\omega C_{\text{пр}})| \quad \dot{\beta} \approx j\omega C_{\text{пр}} \dot{Z}_b \quad \dot{\beta} \dot{K} = -j\omega C_{\text{пр}} S \dot{Z}_b \dot{Z}_K$$

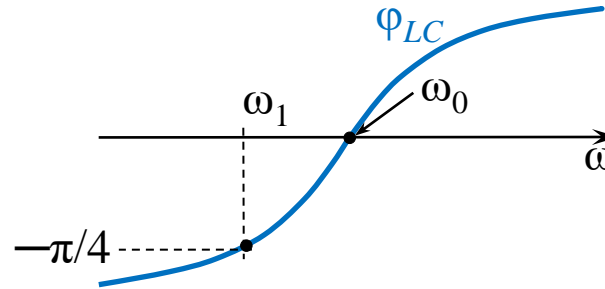
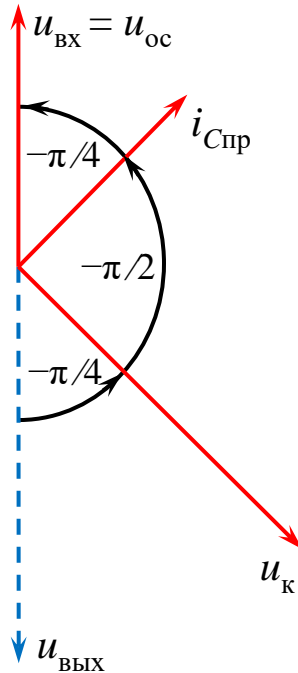
$$\dot{Z}_b = p_b^2 R_{\text{ЭКВ}} / (1 + j \operatorname{tg} \varphi) \quad \text{где } p_b = w_b / w_L, \operatorname{tg} \varphi = R_{\text{ЭКВ}} (\omega C - 1 / (\omega L)),$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = (R_{\text{ВЫХ1}} / p_c^2) \parallel (R_{\text{БХ2}} / p_b^2)$$

$$\dot{Z}_K = p_c^2 R_{\text{ЭКВ}} / (1 + j \operatorname{tg} \varphi) \quad \text{где } p_c = w_c / w_L, R_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ВЫХ2}} \parallel (R_{\text{БХ3}} / n_b^2)$$

Устойчивость резонансного усилителя

$$\dot{\beta}\dot{K} = \frac{-j\omega C_{\text{пр}} S p_b^2 p_c^2 R_{\text{ЭКВ}}^2}{1 - \text{tg}^2 \varphi + j2\text{tg} \varphi}$$



На частоте $\omega_1 = \omega_0 - \omega_0/Q$, где $\varphi = -\pi/4$,

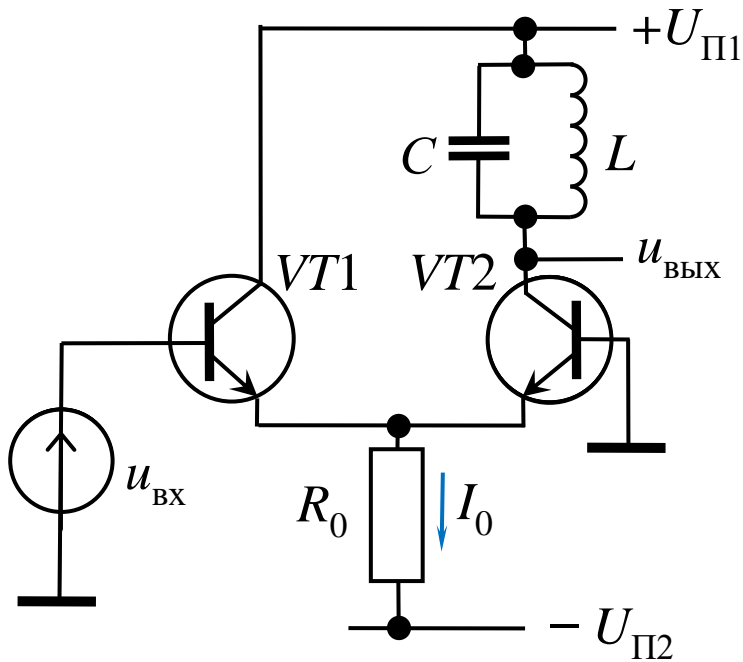
$$\dot{\beta}\dot{K}\Big|_{\varphi=\pi/4} = \left(\omega C_{\text{пр}} S p_b^2 p_c^2 R_{\text{ЭКВ}}^2 \right) / 2$$

Условие отсутствия самовозбуждения

$$\dot{\beta}\dot{K}\Big|_{\varphi=\pi/4} = \left(\omega C_{\text{пр}} S p_b^2 p_c^2 R_{\text{ЭКВ}}^2 \right) / 2 < 1$$

$$\omega_0 C_{\text{пр}} S p_b^2 p_c^2 R_{\text{ЭКВ}}^2 < 2$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя

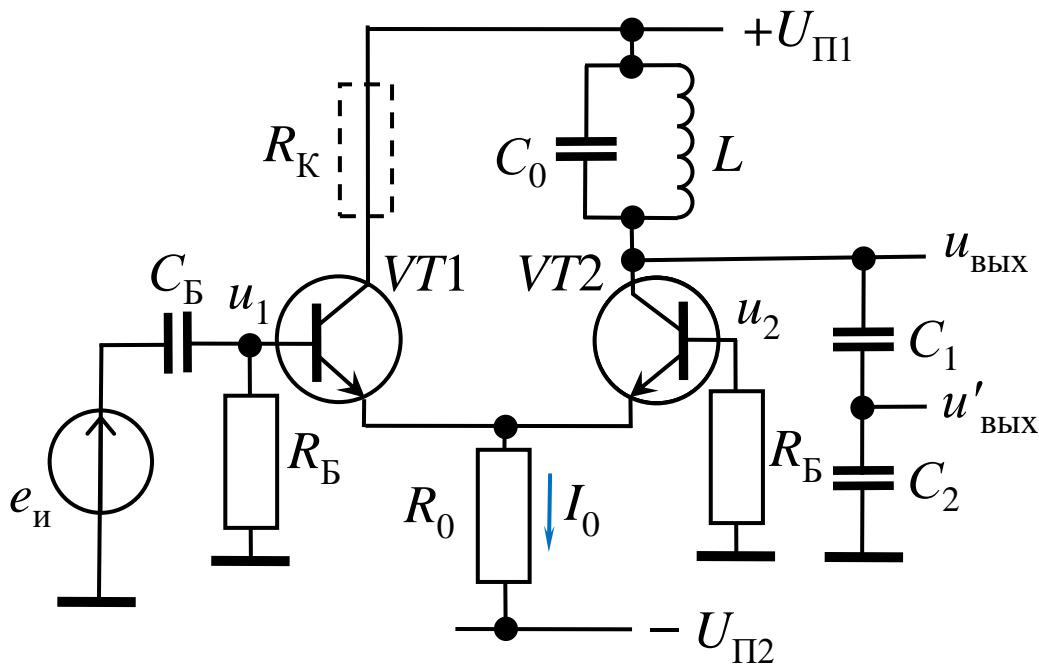


$$\dot{K} = \dot{K}_{\text{диф}} / 2 = S \dot{Z}_{LC} / 2.$$

$$\text{При } \omega = \omega_0 \quad K = SQ\rho / 2.$$

$$R_{\text{ВХ}} = 2h_{11\varepsilon} = 2(r_{\varepsilon 1\varepsilon} + r_{\varepsilon 1\varepsilon}).$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя



$$u_{\text{ВХ}} = u_1 - u_2 = e_{\text{и}} - u_2$$

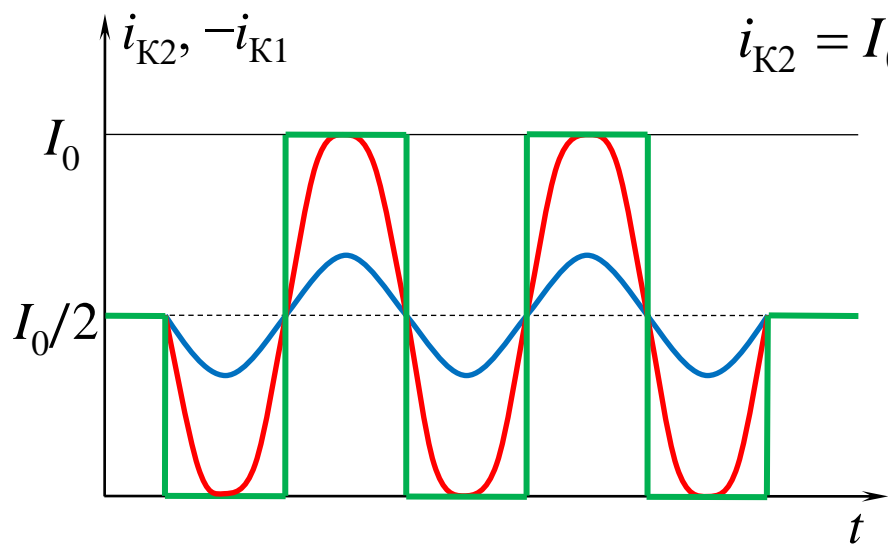
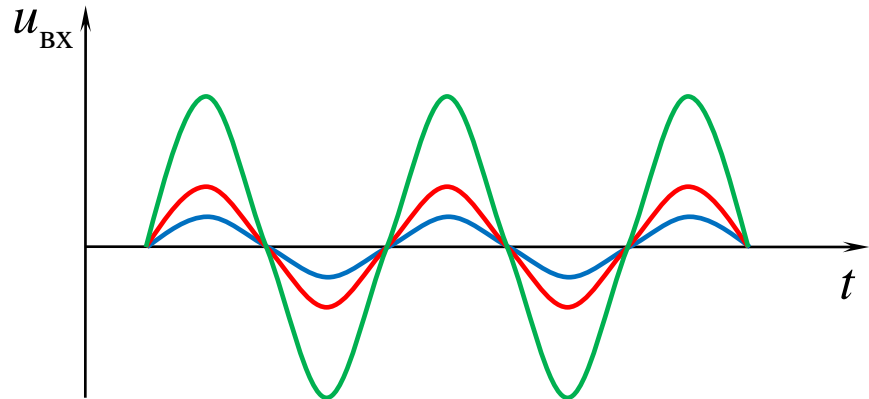
$$K_u = u_{\text{ВЫХ}} / u_{\text{ВХ}} = SR_{\text{ЭКВ}} / 2$$

$$u'_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}} C_1 / (C_1 + C_2)$$

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$$

$$C = C_0 + C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя



$$i_{K2} = I_0/2 + I_1 \cos(\omega_0 t) + I_3 \cos(3\omega_0 t) + \dots$$

$$I_1 = 2I_0/\pi$$

$$U_{\text{вых max}} = \frac{2I_0}{\pi} R_{\text{экв}} = \frac{2I_0}{\pi} \rho Q$$

$$U_{\text{вых max}} < U_{\text{П1}}$$

Резонансный усилитель на основе дифференциального усилителя

